维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1671-4598(2008)04-0485-03　　中图分类号:V247.1; TP391.8　　文献标识码:A

四旋翼微型飞行器控制系统设计

杨明志[1]，王　敏[2]

(1. 南京航空航天大学 自动化学院，江苏 南京　210016；2. 安徽师范大学 数学计算机学院，安徽 芜湖　241000)

摘要：四旋翼微型飞行器是一种以4个电机作为动力装置，通过调节电机转速来控制飞行的欠驱动系统；为了实现四旋翼微型飞行器的自主飞行控制，对飞行控制系统进行了初步设计，并且以C8051F020单片机为计算控制单元，给出了飞行控制系统的硬件设计，研究了设计中的关键技术；由于采用贴片封装和低功耗的元器件，使飞行器具有重量轻、体积小、功耗低的优点；经过多次室内试验，该硬件设计性能可靠，能满足飞行器起飞、悬停、降落等飞行模态的控制要求。

关键词：四旋翼微型飞行器；飞行控制系统；单片机；PWM

Design of Flight Control System for a Four-rotor Mini Rotorcraft

Yang Mingzhi[1], Wang Min[2]

(1. College of Automation & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing　210016, China;
2. College of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu　241000, China)

Abstract: The four-rotor mini rotorcraft is an under-actuated system, which is powered by four motors and flies by adjusting the speed of the motors. In order to realize the autonomous flight control for the four-rotor mini rotorcraft, the preliminary design of flight control System is proposed. The hardware of flight control system is designed based on single-chip microcontroller C8051F020. The key techniques related to hardware design are discussed. Because of the patch package and the low power-consumption of the most elements, the rotorcraft has the characteristics of the small volume, the little weight and the low power-consumption. The test results within doors show that the hardware system is reliable and can meet control requirement under the model of flight, including taking off, hovering, and landing and so on.

Key words: four-rotor mini rotorcraft; flight control system; single-chip microcontroller; PWM

0 引言

由于微型飞行器在军事和民用领域具有广阔的应用前景，近年来，众多的科学家致力于微型飞行器的研究。本文从四旋翼微型飞行器的机型特点和实际需要出发，结合C8051F单片机的优越性能，以C8051F020单片机为计算控制单元，设计了四旋翼微型飞行器飞行控制系统的硬件。该系统体积小、重量轻、功耗低，且结构简单、价格低廉，并能以此为硬件平台，研究各种复杂控制方法。

C8051F020是Cygnal公司开发的工业级全集成混合信号片上系统单片机[1]，具有与MCS-51内核及指令集兼容的CIP-51内核（运算速度高达25兆指令/秒）；C8051F020具有片内调试电路，通过JTAG接口，可以进行非侵入式、全速、在系统调试；C8051F020的片内资源包括：64个通用数字I/O端口、64KB Flash存储器、4352B RAM、8通道12位和8通道10位100 ksps的AD转换器、2个12位DA转换器、2个模拟量比较器、5个通用定时器和可编程计数器阵列(PCA)。另外它还具有外部数据存储器接口（EDMI）、SM-Bus/I^2C总线、SPI总线、2路UART总线、片内电源监视、片内温度监视、片内看门狗定时器和片内时钟源等。这些外设的高度集成，为设计体积小、功耗低、性能好的单片机应用系统提供了方便，可降低系统的整体成本。

收稿日期:2007-06-02；　**修回日期**:2007-07-12。

作者简介:杨明志(1978-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,助理工程师,主要从事无人直升机先进控制理论及应用方向的研究。

1 设计和功能

1.1 控制系统设计

典型的传统直升机配备有一个主转子和一个尾浆。但也存在其他类型的直升机，如双转轴或串列式直升机，同轴直升机等。他们是通过控制舵机来改变螺旋桨的桨距角，从而控制直升机的姿态和位置。而四旋翼微型飞行器与此不同，是通过调节4个电机转速来改变螺旋桨速度，实现升力的变化，从而控制飞行器的姿态和位置。四旋翼微型飞行器没有自动倾斜器。其整机升力由4个电机提供。由于飞行器是通过改变螺旋桨速度实现升力变化，这样会导致其动力不稳定，所以需要一种能够确保长期稳定的控制方法。

四旋翼微型飞行器是一种六自由度的垂直起降机，因此非常适合静态和准静态条件下飞行；但是，四旋翼直升机只有4个输入力，同时却有6个输出，所以它又是一种欠驱动系统。图1为四旋翼微型飞行器的结构俯视图[2]。与传统直升机相比，该飞行器有下列优势：侧面电机1、3顺时针旋转的同时，前后电机2、4逆时针旋转，因此当飞行器平衡飞行时，陀螺效应和空气动力扭矩效应均被抵消[3]。

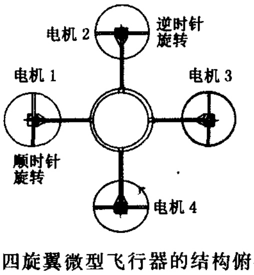

图1　四旋翼微型飞行器的结构俯视图

中华测控网
chinamca.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

飞行器在三维空间中具有 6 个运动自由度，包括 3 个坐标轴方向的线运动和 3 个坐标轴方向的角运动。上下的平移运动是通过 4 个电机同时增速（减速）得到的，当 4 个电机的升力之和等于飞行器的自重时，飞行器便保持悬停。水平面内的前后运动是电机 1、2 增速（减速）的同时，电机 3、4 减速（增速），此时保持旋翼 1、3 对机身的反扭矩等于旋翼 2、4 对机身的反扭矩，在电机 1、2 与电机 3、4 的升力之差作用下机身发生倾斜，得到水平面内的前后运动。俯仰运动是通过电机 1、3 转速保持不变，电机 2 增速（减速）的同时，电机 4 减速（增速）得到的。以类似的方法，滚转运动是通过改变电机 1、3 转速得到的。偏航运动是电机 1、3 增速（减速）的同时，电机 2、4 减速（增速），此时旋翼 1、3 对机身的反扭矩大于（小于）旋翼 2、4 对机身的反扭矩，机身便在多余扭矩的作用下得到偏航运动。组合以上的基本运动，可以实现四旋翼微型飞行器的各种复杂运动。

1.2 主要功能和总体设计

飞行控制器的主要功能如下：

1）提供多个通信信道，使飞行器与陀螺仪、磁航向计、高度计、导航系统、地面测控系统通信；

2）提供足够的存储空间，以满足复杂控制软件的实现；

3）检测飞行器的状态量，包括高度、速度、航向、姿态等；

4）通过 RS232 串行接口与地面测控系统通讯，一方面获取地面的控制信号，另一方面将飞行器的状态信息回传给地面；

5）飞行器能工作在手动/自主的切换模式。

由于四旋翼微型飞行器体积小、重量轻，在飞行中易受外界环境干扰发生飞行事故，在设计中通过地面测控系统，使飞行控制模式能在手动/自主方式自由切换。在手动模式时，飞行器完全由操纵者人工控制；在自主模式时，飞行器按照给定任务自动控制电机完成。图 2 为四旋翼微型飞行器的总体设计。

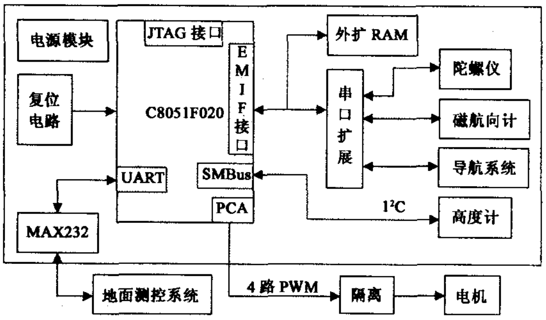

图 2　四旋翼微型飞行器总体设计图

2　系统硬件设计

基于四旋翼微型飞行器体积小、重量轻、功耗低的特点，飞行控制器的设计以 C8051F020 单片机为核心，并且挑选材料时，尽可能选用贴片封装的电阻、电容及元器件，使整机重量减轻，尽可能选用低功耗的 CMOS 元器件，使整机功耗降低。

2.1 外部 RAM 扩展

C8051F020 只有 4352B RAM（4KB 片上 RAM＋256B 核内 RAM），可能不能满足复杂控制软件的实现，因此采用 32K×8 的 SRAM 芯片 IS62C256，使存储空间扩展了 32KB，硬件原理如图 3。

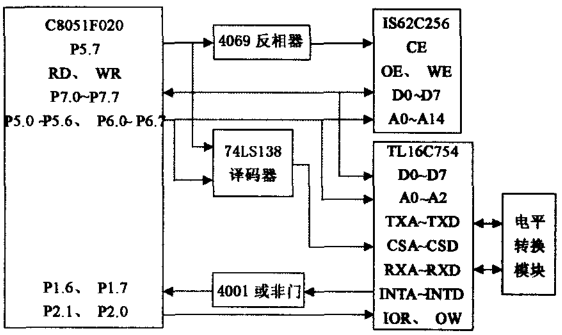

图 3　外部 RAM 扩展及串口通讯扩展电路

2.2 串口通信扩展

C8051F020 只有 2 个增强型 UART 异步串行接口，不能满足多路串行通信的需要。TI 公司的专用串口扩展芯片 TL16C754 波特率高达 3 Mbps，带有 4 个异步通讯单元，扩展的子串口工作波特率可以不一致，收发数据都可以工作在先入先出（FIFO）方式[4]，因此能提高系统效率，降低软件消耗。图 3 为串口扩展的硬件原理图，将地址线配置在单片机的 P5、P6 端口，数据线配置在 P7 端口，采用单片 TL16C754 扩展了 4 路 RS232 串行接口。

2.3 PWM 信号隔离电路

由于飞行器的电机在转动过程中会产生比较大的冲击电流，为了提高飞行控制系统的可靠性，需要对 C8051F020 单片机输出的脉宽调制（PWM）信号进行隔离。整机选用锂电池供电，光电耦合器进行信号隔离时，工作电流大，锂电池供电能力无法满足要求，而且需要大量的电阻、电容配合工作，不利于电路板体积小、重量轻、功耗低的要求。ADI 公司的 iCoupler 系列数字隔离器将 CMOS 与芯片级变压器技术相结合，大大降低了电路板的体积和功耗。如图 4，数字隔离器 ADuM1400 实现了 4 路 PWM 信号的隔离。

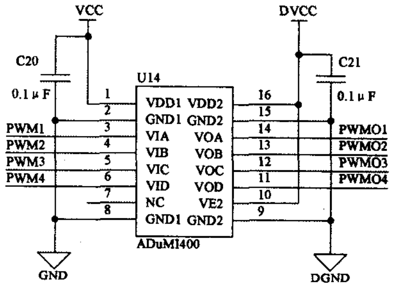

图 4　电机隔离电路

2.4 高度传感器接口电路

飞行器高度的测量选用体积小、重量轻的 SRF08 声纳高度计。SRF08 通过标准的 I²C 总线输出高度信号。C8051F020 的串行口 SMBus 与 I²C 串行总线完全兼容，SMBus 总线通过时钟线 SCL 和数据线 SDA 实现同步串行接收和发送。因为 SMBus 总线接口为漏极开路输出，所以 SCL 线和 SDA 线必须通过上拉电阻连接到正电源上。

3　系统设计中的关键技术

3.1 PWM 信号的实现

在 C8051F020 中有一个比一般的计数/定时器功能更强的

中华测控网
chinamca.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

可编程计数器阵列（PCA），需要较少的 CPU 干预。PCA 由 1 个专用的 16 位计数/定时器和 5 个 16 位捕捉/比较模块组成，每个捕捉/比较模块都有自己的 I/O 线即 CEXn，可通过交叉开关配置到相应的 I/O 引脚。专用的计数/定时器可被 6 种不同的时钟源所驱动，这 6 种时钟源是：定时器 0 溢出，ECI 线上的外部时钟信号，SYSCLK－系统时钟，SYSCLK/4，SYSCLK/12，外部振荡器时钟 8 分频。每个捕捉/比较模块可独立工作于边沿触发捕捉、软件定时、高速输出、频率输出、8 位脉宽调制（PWM）和 16 位 PWM 中的任意一种工作方式。

飞行器的 4 个无刷直流电机由信号周期为 20 ms PWM 信号控制。PWM 由 PCA 的前 4 个捕捉/比较模块产生，选择捕捉/比较模块工作于高速输出方式，通过交叉开关把 CEX0、CEX1、CEX2、CEX3 分别配置到 P1.2、P1.3、P1.4、P1.5 端口。PCA 的时钟源选择外部振荡器 8 分频。C8051F020 单片机可实现高精度的 PWM 输出，但输出的最大电压 VDD 为 3.3V，而电机所需电压为 5V，要将端口引脚设置为推挽输出方式并将输出端通过一个上拉电阻接到 5V 电源，单片机的逻辑“1”输出将被提升到 5V。

在高速输出方式下，每当 PCA 的计数器（PCA0H/L）与捕捉/比较寄存器（PCAOCPHn/Ln）发生匹配时，CEXn 引脚上的逻辑电平将发生改变，同时触发一次中断。在上升沿状态，将 PWM 高电平计数值装入 PCAOCPHn/Ln 中；在下降沿状态，将 0x0000 装入 PCAOCPHn/Ln 中，在 CEXn 引脚上便得到 16 位 PWM。比如，对于电机 1：

```
Void PCA_ISR (void) interrupt 9
{
    …
    if (CCF0)
    {
    CCF0 = 0; // 清除比较标志
    if (PWM_ Motor1OUT)
    { //处理上升沿,设置 PWM 的下一个匹配值
    PCA0CPL0 = (0xff & PWM_Motor1);
    PCA0CPH0 = (0xff & (PWM_Motor1>> 8));
    }
    else
    { //处理下降沿,设置 PWM 的下一个匹配值 0
    PCA0CPL0 = 0;
    PCA0CPH0 = 0;
    }
    }
    if (CCF1)
    …
}
```

占空比＝PWM/65536，改变 PWM 值就可以改变占空比，实现电机转速的调节，从而改变飞行器的姿态和位置。

3.2 存储空间和 I/O 空间的地址分配

C8051F020 是单片机结构的片上系统，内部 256 个单元的 RAM 和寄存器单独编址，片上 4KB RAM、外部扩展存储器及 I/O 空间采用统一编址的方式，因此必须合理设计片上 RAM、外部扩展 SRAM 和 I/O 的空间分配。如图 3，地址信号 A15（P5.7）经过反相器 4069 输入给外扩 SRAM，A15 经过 3－8 译码器输入给串口扩展芯片，实现空间地址的分离。译码电路实现如图 5。

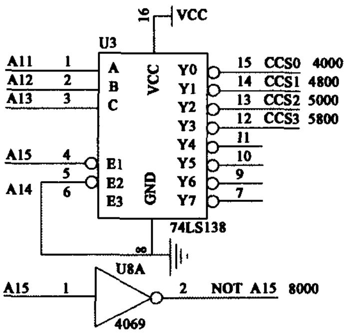

图 5　地址译码电路

存储空间和 I/O 空间地址分配如表 1。设计的地址译码电路实现简单，不仅把外部 SRAM 和片上 RAM 分开，而且各个扩展串口的空间也相互独立。

表 1　存储空间和 I/O 空间地址分配

片上 RAM	0H－0FFFH；
UART0	4000H－4007H；
UART1	4800H－4807H；
UART2	5000H－5007H；
UART3	5800H－5807H；
外部扩展 SRAM	8000H－FFFFH；

3.3 单片机与外设的时序匹配

外扩存储器 IS62C256、串口扩展芯片 TL16C754 通过总线与 C8051F020 互连进行数据交换时，时序匹配是数据可靠传输的保证。由于 IS62C256 和 TL16C754 同处于 C8051F020 的外部总线上，所以两个必须同时满足。可通过研究两者的时序并对单片机进行相应设置加以解决。如，外部振荡器配置为 22.1184 MHz 晶振，系统时钟选择外部振荡器，并且采取不分频方式。IS62C256 时序配置要求：地址信号的建立和保存都至少 25 ns 和 35 ns，读写脉冲宽度至少 45 ns。通过设置单片机的外部存储器时序控制寄存器（EMIOTC）为 0x45，使两者时序达到最佳匹配状态。

3.4 整机供电与功耗的考虑

整机选用能量密度高、重量轻的 12 V 锂电池供电，由于锂电池电量有限，所以能耗是衡量控制器性能的一项重要指标。在信号匹配的前提下尽量选用低功耗的 CMOS 芯片，降低系统总功耗。12 V 给 4 个无刷直流电机和磁航向计供电。12 V 电源经过稳压块 MC7809CT 和 MC7805T 变换成 9 V 和 5 V，给传感器和元器件供电。利用 TI 公司的稳压块 TPS7333Q 把 VCC

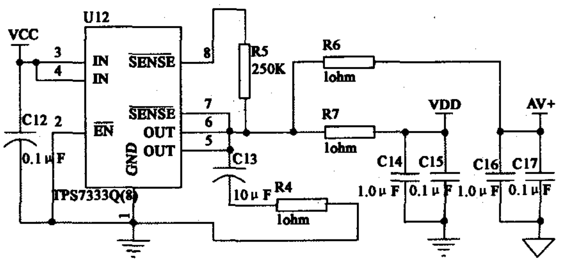

图 6　C8051F020 工作电压的转换

（下转第 490 页）

中华测控网
chinamca.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

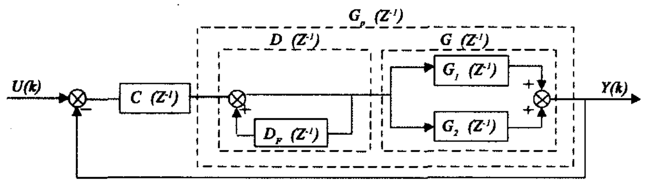

图6　前置反馈解耦控制结构框图

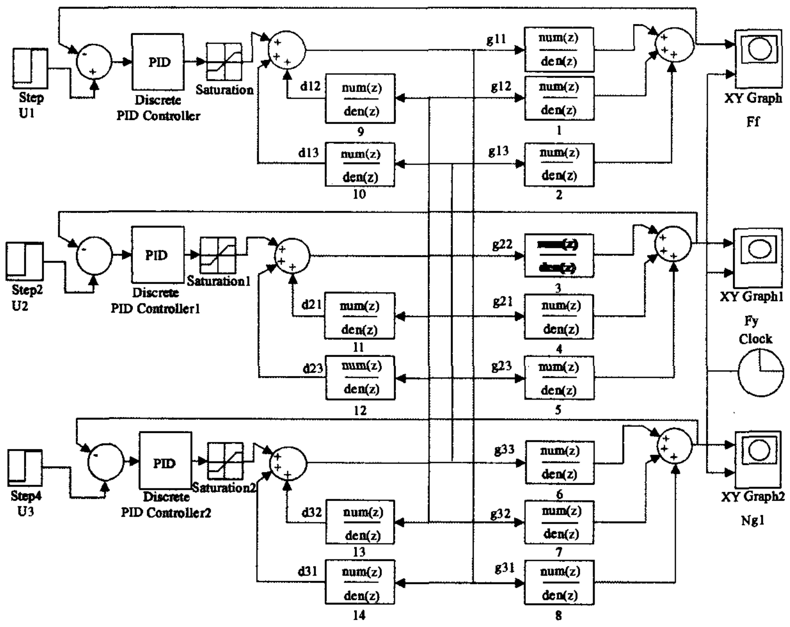

图7　前置反馈解耦控制仿真模型

由 $G(s)=[G_1(s)+G_2(s)]$ 其中 $G_1(s)$、$G_2(s)$ 分别表示为：

$$G_1(z^{-1})=\begin{bmatrix} g_{11}(z^{-1}) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{22}(z^{-1}) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & g_{nn}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$G_2(z^{-1})=\begin{bmatrix} 0 & g_{12}(z^{-1}) & \cdots & g_{1n}(z^{-1}) \\ g_{21}(z^{-1}) & 0 & \cdots & g_{2n}(z^{-1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1}(z^{-1}) & g_{n2}(z^{-1}) & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

令解耦目标矩阵 $G_p(z^{-1})=G_1(z^{-1})$，由式子（10）～（13）可求得补偿解耦矩阵 $D_F(z^{-1})$ 为：

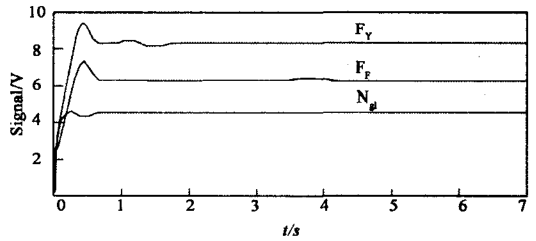

图8　解耦后的张力一速度仿真波形图

$$D_{Fij}(z^{-1})=\begin{cases} -g_{ij}(z^{-1})/g_{ii}(z^{-1}) & (i\neq j) \\ 0 & (i=j) \end{cases} \quad (14)$$

若不考虑控制矩阵 $C(z^{-1})$ 的作用，要使系统解耦，只需 $G_p(z^{-1})$ 为对角矩阵或对角占优矩阵，即可实现系统完全解耦或部分解耦。

6　仿真结果及分析

通过多次实验得到系统传递函数矩阵 $G(z^{-1})$，并由（14）式求出补偿解耦矩阵 $D_F(z^{-1})$，然后用 Matlab 在 Simulink 环境中进行仿真，仿真模型连接如图7所示，通过仿真得到的输出波形图如图8所示。其中输入 $U_F(k)=U_1(k)=5.64V$，$U_{G1}(k)=U_2(k)=7.98V$，$U_{G2}(k)=U_3(k)=5.82V$，此时各个输出变量的大小为：$F_F=63.4kN$，$F_Y=82.1kN$，$N_{G1}=458r/min$。由图可以看出控制系统能在较快的时间内达到稳定，且和解耦前的仿真波形相比，张力一速度之间的耦合程度大大降低，基本上能满足系统的精度要求，达到了改善系统控制效果。

7　结论

本文在对凹印机张力控制系统进行建模的基础上，并针对模型中张力一速度之间的强耦合，对张力控制系统采取了前置的反馈解耦控制算法，仿真结果表明该方法能基本消除张力一速度的强耦合，改善系统的动态性能，提高系统的鲁棒性。

参考文献：

[1] 贺建军. 板带钢平整机张力一速度解耦控制 [J]. 控制与决策，2003，18（5）：522－526.

[2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统（第3版）[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[3] 胡　晖. 多变量反馈解耦控制系统研究 [J]. 控制工程，2004，11（6）：500－502.

（上接第487页）

（5 V）转化成 C8051F020 单片机工作的数字电源 VDD（3.3 V）和模拟电源 AV+（3.3 V），如图6所示。

4　结束语

利用 C8051F020 单片机的优越性能，使设计的四旋翼微型飞行器具有体积小、重量轻、功耗低的特点。经过多次室内试验，该硬件性能稳定，能满足飞行器起飞、悬停、降落等飞行模态的控制要求。该硬件也可作为复杂控制方法的开发平台。

参考文献：

[1] 鲍可进. C8051F020单片机原理及应用 [M]. 北京：中国电力出版社，2006.

[2] McKerrow P. Modeling the Dragon－flyer Four－Rotor Helicopter [J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2004：3596－3601.

[3] Bouabdallah S, Murrieri P, Siegwart R. Design and control of an indoor micro quadrotor [J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2004：4393－4398.

[4] TL16C754 Quad uart With 64－Byte FIFO [Z]. Texas Instruments Incorporated, 1999.

中华测控网
chinamca.com